

УДК 622.7

В.И. КРИВОЩЕКОВ, канд. техн. наук
(Укряна, Днепропетровск, Национальный горный университет)

ТУРБУЛЕНТНО-ДИФфуЗИОННАЯ МОДЕЛЬ ГИДРОЦИКЛОНА С ПЕРЕЧИСТКОЙ В ЕГО КОНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. При теоретическом исследовании турбулентных однофазных течений вязкой среды используются уравнения Навье-Стокса и уравнения Рейнольдса осредненного турбулентного движения. В случае двухфазной среды гидродинамическая структура турбулентного потока значительно усложняется, что связано с взаимовлиянием твердой и жидкой фаз пульпы. Поэтому для исследования гидродинамики двухфазных течений используются уравнения многофазных сред [1, 2].

Получение эмпирических зависимостей для исследования изменения концентрации твердой фазы в турбулентном потоке пульпы обуславливает необходимость учета взаимодействия твердых частиц между собой и со стенками канала, характеристик турбулентного потока, крупности частиц, а также геометрических параметров канала. При этом сложный характер таких течений заставляет прибегать к экспериментальным исследованиям и имитационному моделированию, причем, используемые при математическом моделировании допущения могут приводить к погрешности вычислений, и как следствие, к искажению реальной гидродинамической структуры турбулентного течения.

Анализ исследований и публикаций. При исследовании процесса формирования осадка в суживающихся каналах необходимо установить связь между интенсивностью турбулентности, коэффициентом турбулентной диффузии и изменением концентрации твердой фазы. В работах [3 – 5] связь между указанными гидродинамическими параметрами либо приведена частично, либо носит неоднозначный характер. Рассмотренную в работе [3] двухслойную схему течения пульпы можно использовать для исследования механизма образования осадка в суживающихся и расширяющихся каналах [6], однако в случае турбулентного движения пульпы в гидроциклоне двухслойная схема может давать определенные погрешности. Это предположительно связано с тем, что данная схема адаптирована для ламинарного течения пульпы по наклонной поверхности и не учитывает влияние интенсивности турбулентности на процесс расслоения пульпы. Кроме того, в работе [3] не приведены соотношения для коэффициентов турбулентной диффузии твердых частиц различной крупности.

При перерісткє твердой фазы пульпы в гидроциклонах представляют интерес гидродинамические эффекты, которые повышают качество ее разделения.

Использование этих эффектов возможно при детальном исследовании процессов массопереноса [4, 7, 8] и изменения концентрации твердых частиц в вихревых потоках пульпы. Поэтому исследование особенностей осаждения твердой фазы при вихревом движении пульпы является актуальной задачей.

Постановка задачи. Цель данной работы – построение турбулентно-диффузионной модели гидроциклона с перерісткой в его конической части.

Изложение материала и результаты. Рассмотрим особенности осаждения твердой фазы при турбулентном движении пульпы, принимая за объект исследований коническую часть гидроциклона (рис. 1).

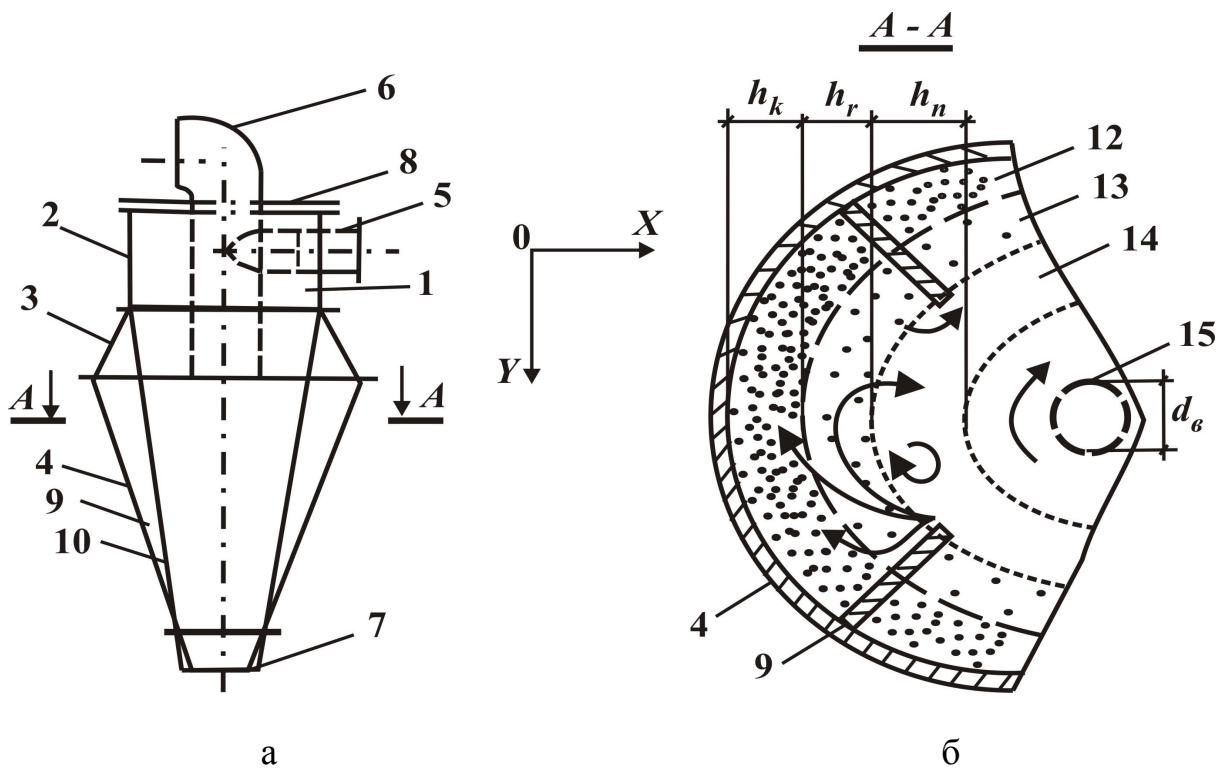


Рис. 1. Схемы гидроциклона (а) и турбулентного течения пульпы в его конической его части (б):

h_k, h_r, h_n – толщина концентрированного, разрыхленного и перерістного слоев пульпы, м; d_e – диаметр воздушного столба, м

Гидроциклон (рис. 1) имеет корпус 1, состоящий из цилиндрической части 2 и биконической части, которая выполнена из двух соединенных большими основаниями усеченных конусов 3 и 4. Тангенциально к цилиндрической части корпуса установлен питающий патрубок 5, а соосно корпусу 1 расположены

сливной патрубок 6 и песковая насадка 7. Верхняя часть корпуса ограничена крышкой 8. На внутренней поверхности усеченных конусов 3 и 4 попарно диаметрально установлены направляющие пластины 9, кромки 10 которых образуют коническую поверхность с вершиной в сторону песковой насадки 7.

Конструктивные особенности гидроциклона обеспечивают образование в межпластинчатых каналах концентрированного 12, разрыхленного 13 и перечистного 14 слоев пульпы [9, 10], а также воздушного столба 15.

В направлении к песковой насадке 7 высота пластин и межпластинчатого канала, а также его ширина постепенно уменьшаются (рис. 2). В качестве ширины межпластинчатого канала принято расстояние между центрами соседних пластин.

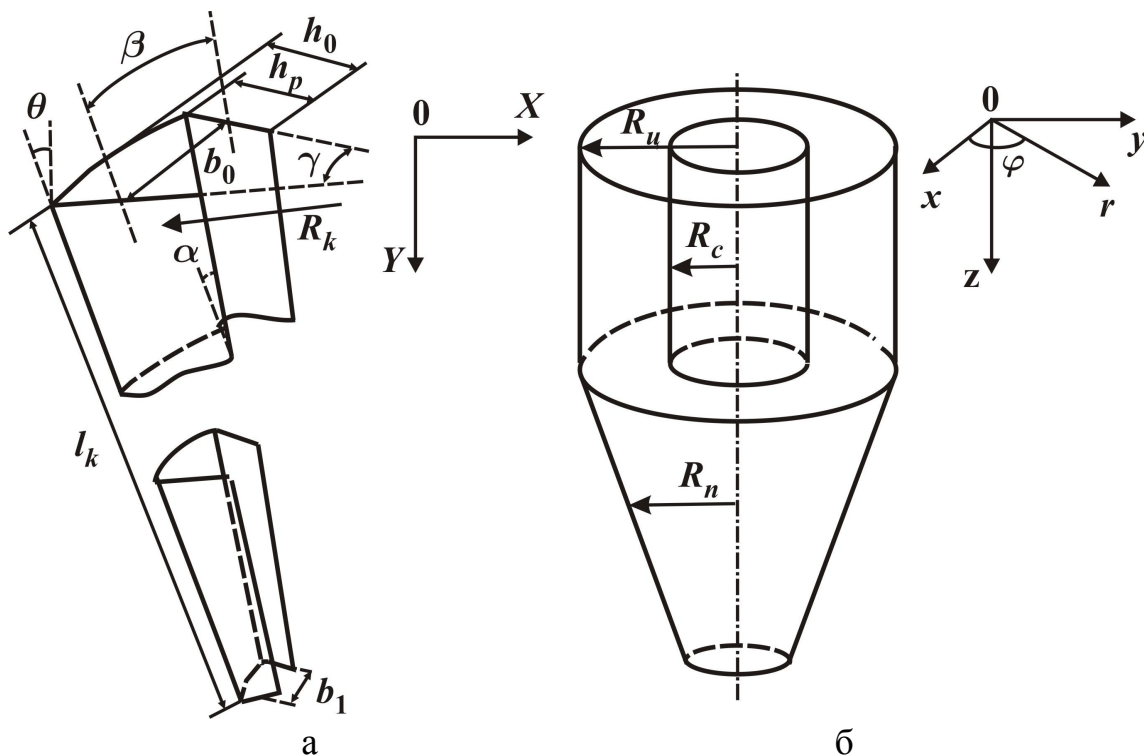


Рис. 2. Схемы межпластинчатого канала (а) и цилиндриконической части гидроциклона (б):

h_p и h_0 – начальная высота пластин и межпластинчатого канала, м;
 b_0 и b_1 – начальная и конечная ширина межпластинчатого канала, м;
 l_k – длина канала, м; α и β – угол конусности пластин и боковых стенок канала, град;
 γ и θ – угол наклона боковых стенок канала в горизонтальной плоскости и дна канала к оси OY , град; R_u , R_c , R_n , R_k – радиусы кривизны цилиндрической поверхности, внешней поверхности сливного патрубка, перечистного слоя пульпы и конической поверхности, м; l_u – длина цилиндрической части гидроциклона, м;
 r и z – радиальная и осевая цилиндрические координаты, м;
 φ – угловая цилиндрическая координата, град

Влияние центробежного поля сил и неоднородность гидродинамической

структуры основного вихревого потока в гидроциклоне приводят к повышению концентрации твердой фазы в направлении стенок корпуса. Образование разрыхленного слоя пульпы связано с влиянием вихрей, проникающих внутрь межпластинчатых каналов. Вблизи внутренних кромок пластин происходит захват отрывными течениями твердых частиц из перечистного слоя и их попадание в межпластинчатый канал. Закономерности отрыва потока пульпы с внутренних кромок пластин и формирование за ними вихрей идентичны случаю поперечного обтекания пластины турбулентным потоком вязкой жидкости [1], а также случаю обтекания прямоугольных элементов, расположенных на поверхности стенки [11]. Угол наклона пластин (рис. 2,а) препятствует выносу крупных частиц за пределы межпластинчатого канала.

Как видно из рис. 1,б, граница раздела между разрыхленным и перечистным слоями пульпы находится на расстоянии $h_k + h_r$ от дна канала и проходит ниже кромок пластин. Это связано с тем, что энергии основного вихревого потока пульпы достаточно для частичного преодоления гидравлического сопротивления, создаваемого пластинами. Ниже границы раздела указанных слоев пульпы тангенциальная составляющая скорости становится равной нулю, а продольная составляющая возрастает в направлении дна канала и достигает своего максимального значения в концентрированном слое пульпы. По этой причине в межпластинчатых каналах происходит формирование нисходящего безвихревого течения, аналогами которому являются турбулентные течения пульпы в каналах с параллельными и суживающимися стенками [3, 6].

Сравнивая гидроциклон, имеющий в конусной части межпластинчатые каналы с обычным цилиндрическим гидроциклоном, отметим, что, несмотря на то, что пластины создают дополнительные гидравлические сопротивления, они способствуют увеличению расхода концентрированного и разрыхленного слоев пульпы, так как не участвуют во вращательном движении. При этом, по мере движения пульпы в межпластинчатых каналах, происходит ее дальнейшее уплотнение и вблизи песковой насадки содержание твердого достигает своего максимального значения [10]. В случае отсутствия межпластинчатых каналов действие основного вихревого потока распространяется до стенок корпуса и продольная составляющая скорости пристенного слоя пульпы будет меньше. В результате этого происходит более интенсивный вынос крупных и мелких частиц из пристенной зоны и содержание твердой фазы пульпы вблизи песковой насадки уменьшается.

Введем предложенную в работе [12] технологическую классификацию твердых частиц по крупности, согласно которой твердая фаза пульпы состоит из тонких, мелких и крупных частиц диаметром d_i . Эти частицы связаны с величиной микромасштаба турбулентности λ следующими соотношениями:

$d_i \ll \lambda, d_i \sim \lambda, d_i \gg \lambda$, соответственно.

Рассмотрим турбулентно-диффузионную модель гидроциклона с перечисткой в его конической части (рис. 1, б; рис. 2), в которой концентрированный и разрыхленный слой пульпы в межпластинчатом канале заменим однослойным потоком, граничащим с перечистным слоем.

Применительно к турбулентному течению пульпы в межпластинчатом канале воспользуемся уравнениями осредненного турбулентного движения двухфазной среды для случая локально однородной и изотропной турбулентности [13]. В качестве гидродинамических параметров в уравнениях осредненного турбулентного движения рассматриваются их осредненные по времени значения.

Для тонких частиц:

$$\begin{cases} \operatorname{div} u = 0; \\ \frac{\partial u}{\partial t} + (u \nabla) u = \frac{1}{\rho} F - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} P + \nu \Delta u; \\ \frac{\partial \tilde{N}_t}{\partial t} = \operatorname{div} (D_t \operatorname{grad} \tilde{N}_t - \tilde{N}_t u_t - B_t \tilde{N}_t F_t); \\ \frac{\partial u_t}{\partial t} + (u_t \nabla) u_t = \frac{1}{\rho_t} F_t - \frac{1}{\rho_t} \operatorname{grad} P_t + \nu_t \Delta u_t + \frac{\nu_{\div}}{3} \operatorname{grad} (\operatorname{div} v_{\div}), \end{cases} \quad (1)$$

где u_t и u – результирующие скорости тонких частиц и турбулентных вихрей разделяющей среды в данной точке потока пульпы, м/с; ρ_t и ρ – плотности твердых частиц и жидкой фазы пульпы, кг/м³; F_t и F – результирующие объемных сил, действующих на тонкие частицы и турбулентные вихри разделяющей среды, отнесенные к единице объема пульпы, Н/м³; P и P_t – давления жидкой фазы в данной точке потока пульпы и на поверхностях тонких частиц, Па; ν_T и ν_t – коэффициенты турбулентной вязкости жидкой фазы и макровязкости тонких частиц, м²/с; C_t – объемная концентрация тонких частиц, кг/м³; D_t – коэффициент турбулентной диффузии тонких частиц, м²/с; B_t – коэффициент подвижности тонких частиц, с/кг; t – текущее время, с.

Для мелких частиц:

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{div} u = 0; \\ \frac{\partial u}{\partial t} + (u \nabla) u = \frac{1}{\rho} F - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} P + \nu \Delta u; \\ \frac{\partial \tilde{N}_m}{\partial t} = \operatorname{div} (D_m \operatorname{grad} \tilde{N}_m - \tilde{N}_m u_m - B_m \tilde{N}_m F_m); \\ \frac{\partial u_m}{\partial t} + (u_m \nabla) u_m = \frac{1}{\rho_+} F_m, \end{array} \right. \quad (2)$$

где u_m – результирующая скорость мелких частиц в данной точке потока пульпы, м/с; F_m – результирующая объемных сил, действующих на мелкие частицы, отнесенная к единице объема пульпы, Н/м³; C_m – объемная концентрация мелких частиц, кг/м³; D_m – коэффициент турбулентной диффузии мелких частиц, м²/с; B_m – коэффициент подвижности мелких частиц, с/кг.

Для крупных частиц:

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{div} u = 0; \\ \frac{\partial u}{\partial t} + (u \nabla) u = \frac{1}{\rho} F - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} P + \nu \Delta u; \\ \frac{\partial \tilde{N}_k}{\partial t} + u_k \operatorname{grad} \tilde{N}_k = 0; \\ \frac{\partial u_k}{\partial t} + (u_k \nabla) u_k = \frac{1}{\rho_+} F_k, \end{array} \right. \quad (3)$$

где u_k – результирующая скорость крупных частиц в данной точке потока пульпы, м/с; F_k – результирующая объемных сил, действующих на крупные частицы, отнесенная к единице объема пульпы, Н/м³; C_k – объемная концентрация крупных частиц, кг/м³.

В качестве результирующей объемных сил F , действующих на турбулентные вихри разделяющей среды, как правило, рассматривают силу тяжести [11]. Поэтому можно записать, что

$$F = \rho g, \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Рассматривая вместо плотности жидкой фазы пульпы плотность твердых

частиц, получаем аналогичные соотношения для результирующих объемных сил, действующих на тонкие, мелкие и крупные частицы.

Коэффициенты турбулентной диффузии для тонких, мелких и крупных частиц определяются следующим образом [12]:

$$\begin{cases} D_t = \frac{1}{3}\lambda IU; \\ D_m = \frac{\lambda IU}{3\left(1 + \frac{IUd_m^2\rho_{\div}}{18\lambda\mu_p}\right)}; \\ D_k = -\frac{\lambda^3\rho_p I^2 U^2}{54d_k\mu_p}, \end{cases} \quad (5)$$

где U – средняя скорость турбулентного потока пульпы, м/с; μ_p – динамическая вязкость пульпы, Н·с/м; ρ_p – плотность пульпы, кг/м³; I – интенсивность турбулентности, д.е., которая согласно работам [12, 13] определяется так:

$$I = \sqrt[3]{\frac{\lambda}{L}}, \quad (6)$$

где L и λ – макро- и микромасштабы турбулентности, м.

Средняя скорость турбулентного потока пульпы, плотность пульпы и ее динамическая вязкость [2, 6] соответственно:

$$\begin{cases} U = \frac{1}{\rho_d} \left[\rho_{\div} (C_t u_t + C_m u_m + C_k u_k) + \rho u (1 - C_t - C_m - C_k) \right]; \\ \rho_{\delta} = \rho_{\div} (C_t + C_m + C_k) + \rho (1 - C_t - C_m - C_k); \\ \mu_{\delta} = \mu \left[1 + 2(C_t + C_m + C_k) \left(1 + 1,2(C_t + C_m + C_k)^{\frac{2}{3}} \right)^{-2} \right]. \end{cases} \quad (7)$$

Соотношения для геометрических параметров межпластинчатого канала

(рис. 2,а), а именно, угол конусности β боковых стенок канала [3], изменения его средней ширины $b(y)$ и высоты $h(y)$ вдоль оси OY соответственно будут:

$$\begin{cases} \beta = \arctg \left[(b_0 - b_1)(2l_k)^{-1} \right]; \\ b(y) = b_0 - y \operatorname{tg} \beta; \\ h(y) = R_\varepsilon \left(1 - \cos \frac{\gamma}{2} \right) - y \operatorname{tg} \alpha, \end{cases} \quad (8)$$

где y – расстояние вдоль оси OY , м.

Рассматривая двухмерное течение пульпы в межпластинчатом канале, введем декартовы координаты x_i, x_j , где $i, j = 1, 2$ (x, y) и $i \neq j$. Тогда соотношения для дифференциальных операторов, входящих в системы уравнений (1) – (3), можно представить так [14]:

$$\begin{cases} \nabla \equiv \operatorname{grad} \equiv \frac{\partial}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j}; \\ \operatorname{div} = \frac{\partial}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}; \\ \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \end{cases} \quad (9)$$

где \mathbf{i}, \mathbf{j} – единичные векторы осей координат OX и OY .

С учетом выражений (4), (9) системы уравнений (1) – (3) представим в проекциях на оси координат [15].

Для тонких частиц:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + v_o \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i}; \\ \frac{\partial \tilde{N}_t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_t \frac{\partial \tilde{N}_t}{\partial x_j} - \tilde{N}_t (u_t)_i - B_t \tilde{N}_t \rho_{\pm} g_i \right); \\ \frac{(u_t)_i}{\partial t} + \frac{\partial [(u_t)_i (u_t)_j]}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho_{\pm}} \frac{\partial P_t}{\partial x_i} + v_{\pm} \frac{\partial^2 (u_t)_j}{\partial x_i \partial x_i} + \frac{v_{\pm}}{3} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_{\pm}}{\partial x_i} \right). \end{array} \right. \quad (10)$$

Для мелких частиц:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + v_o \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i}; \\ \frac{\partial \tilde{N}_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_m \frac{\partial \tilde{N}_m}{\partial x_j} - \tilde{N}_m (u_m)_i - B_m \tilde{N}_m g_i \rho_{\pm} \right); \\ \frac{(u_m)_i}{\partial t} + \frac{\partial [(u_m)_i (u_m)_j]}{\partial x_j} = g_i. \end{array} \right. \quad (11)$$

Для крупных частиц:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + v_o \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i}; \\ \frac{\partial \tilde{N}_k}{\partial t} + u_k \frac{\partial \tilde{N}_k}{\partial x_i} = 0; \\ \frac{(u_k)_i}{\partial t} + \frac{\partial [(u_k)_i (u_k)_j]}{\partial x_j} = g_i. \end{array} \right. \quad (12)$$

Проекції сили тяжести на осі координат $0X$ і $0Y$ определяються следующим образом:

$$\begin{cases} g_x = g \sin \theta; \\ g_y = g \cos \theta, \end{cases} \quad (13)$$

где θ – угол наклона межпластинчатого канала к оси $0Y$ (рис. 2,а).

Исходя из соотношений (8) запишем граничные условия для систем уравнений (10) – (12).

По линии раздела (рис. 1,б) разрыхленного и перечистного слоев пульпы ($x = h_k + h_r$):

$$\begin{aligned} u_x = u_p; u_y = u_h; (u_t)_x = (u_t)_p; (u_t)_y = (u_t)_h; (u_m)_x = (u_m)_p; (u_m)_y = (u_m)_h; \\ (u_k)_x = (u_k)_p; (u_k)_y = (u_k)_h; C_t = (C_t)_h; C_m = (C_m)_h; C_k = (C_k)_h; P = P_h; P_t = (P_t)_h; \\ v_t = (v_t)_h; B_t = (B_t)_h; B_m = (B_m)_h; D_t = (D_t)_h; D_m = (D_m)_h. \end{aligned}$$

На дне канала ($x = 0$):

$$\begin{aligned} u_x = u_y = 0; (u_t)_x = (u_t)_0; (u_t)_y = (u_t)_f; (u_m)_x = (u_m)_0; (u_m)_y = (u_m)_f; (u_k)_x = (u_k)_0; \\ (u_k)_y = (u_k)_f; C_t = (C_t)_{\max}; C_m = (C_m)_{\max}; C_k = (C_k)_{\max}; P = P_f; P_t = (P_t)_f; \\ v_t = (v_t)_f; B_t = (B_t)_{\min}; B_m = (B_m)_{\min}; D_t = (D_t)_{\min}; D_m = (D_m)_{\min}. \end{aligned}$$

Начальные условия ($y = 0, t = 0$):

$$\begin{aligned} u_x = u_n; u_y = u_h; (u_t)_x = (u_t)_0; (u_t)_y = (u_t)_n; (u_m)_x = (u_m)_0; (u_m)_y = (u_m)_n; \\ (u_k)_x = (u_k)_0; (u_k)_y = (u_k)_n; C_t = (C_t)_n; C_m = (C_m)_n; C_k = (C_k)_n; P = P_n; P_t = (P_t)_n; \\ v_t = (v_t)_n; B_t = (B_t)_n; B_m = (B_m)_n; D_t = (D_t)_n; D_m = (D_m)_n. \end{aligned}$$

Рассмотрим турбулентное трехмерное течение пульпы в цилиндрической части гидроциклона (рис. 2,б) с учетом перечистного слоя. Введем цилиндрическую систему координат q_i, q_j, q_k , где $i, j, k = 1, 2, 3$ (r, φ, z). Здесь r, φ, z представляют собой радиальную, угловую и осевую цилиндрические координаты [1].

Соотношения для дифференциальных операторов в цилиндрической системе координат [14] можно записать так:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \equiv grad \equiv \frac{\partial}{\partial q_j}; \\ grad_r = \frac{\partial}{\partial r}; \\ grad_\varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi}; \\ grad_z = \frac{\partial}{\partial z}; \\ div = \frac{\partial}{\partial q_k} (r) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \frac{\partial}{\partial z}; \\ \Delta = \frac{\partial}{\partial q_k} \left(r \frac{\partial}{\partial q_j} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \end{array} \right. \quad (14)$$

В соответствии с [1, 16] и выражениями (10), (14) систему уравнений (1) для тонких частиц в проекциях на оси цилиндрической системы координат представим следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(ru_k)}{\partial q_k} = 0; \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} + A \frac{\partial u_i}{\partial q_j} + E_j = \frac{1}{\rho} \left(g_j - \frac{\partial P}{\partial q_j} \right) + v_\partial \left[\frac{\partial}{\partial q_k} \left(r \frac{\partial u_j}{\partial q_j} \right) + N_j \right]; \\ \frac{\partial \tilde{N}_t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial q_k} \left[r \left(D_t \frac{\partial \tilde{N}_t}{\partial q_j} - \tilde{N}_t (u_t)_k - B_t \tilde{N}_t \rho_\pm g_k \right) \right]; \\ \frac{\partial (u_t)_i}{\partial t} + M \frac{\partial (u_t)_i}{\partial q_j} + S_j = \frac{1}{\rho_\pm} \left(g_i - \frac{\partial P_t}{\partial q_j} \right) + v_\pm \left[\frac{\partial}{\partial q_i} \left(r \frac{\partial (u_t)_j}{\partial q_j} + \frac{1}{3} \frac{\partial (r(u_t)_k)}{\partial q_k} \right) + W_j \right], \end{array} \right. \quad (15)$$

где $A = u_r + \frac{u_\varphi}{r} + u_z$; $M = (u_t)_r + \frac{(u_t)_\varphi}{r} + (u_t)_z$; u_r , u_φ , u_z – радиальная, тангенциальная и осевая составляющие скорости жидкой фазы пульпы, м/с; $(u_t)_r$, $(u_t)_\varphi$, $(u_t)_z$ – радиальная, тангенциальная и осевая составляющие скорости тонких частиц, м/с; E_i , N_j , S_j , W_j – матрицы-столбцы, элементы которых

соответствуют цилиндрическим координатам q_i, q_j :

$$E_i = \begin{pmatrix} -\frac{u_\varphi^2}{r} \\ \frac{u_r u_\varphi}{r} \\ 0 \end{pmatrix}; N_j = \begin{pmatrix} -\frac{(u_t)_r^2}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial(u_t)_\varphi}{\partial\varphi} \\ \frac{2}{r^2} \frac{\partial(u_t)_r}{\partial\varphi} - \frac{(u_t)_\varphi}{r^2} \\ 0 \end{pmatrix}; S_j = \begin{pmatrix} -\frac{(u_t)_\varphi^2}{r} \\ \frac{(u_t)_r (u_t)_\varphi}{r} \\ 0 \end{pmatrix}; W_j = \begin{pmatrix} -\frac{(u_t)_r^2}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial(u_t)_\varphi}{\partial\varphi} \\ \frac{2}{r^2} \frac{\partial(u_t)_r}{\partial\varphi} - \frac{(u_t)_\varphi}{r^2} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Из анализа систем уравнений (1), (2), (3) и (15) видно, что W_j входит только в систему уравнений (1).

Для мелких частиц первые три уравнения системы (2) и выражения для A, M, E_i, N_j, S_j записываются аналогично системе уравнений (15), а четвертое уравнение как:

$$\frac{\partial(u_m)_i}{\partial t} + M \frac{\partial(u_m)_i}{\partial q_j} + S_j = \frac{1}{\rho_\mp} \left(g_i - \frac{\partial P_m}{\partial q_j} \right). \quad (17)$$

Для крупных частиц первое и второе уравнения системы (3), а также выражения для A, M, E_i, N_j, S_j записываются аналогично системе уравнений (15), а третье и четвертое уравнения представим в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{N}_k}{\partial t} + u_k \frac{\partial \tilde{N}_k}{\partial q_j} = 0; \\ \frac{\partial(u_k)_i}{\partial t} + M \frac{\partial(u_k)_i}{\partial q_j} + S_j = \frac{1}{\rho_\mp} \left(g_i - \frac{\partial P_k}{\partial q_j} \right). \end{cases} \quad (18)$$

Граничные условия на внешней поверхности сливного патрубка гидроциклона ($r = R_c$):

$$\begin{aligned} u_r = u_\varphi = u_z = 0; (u_t)_r = (u_t)_\varphi = 0; (u_t)_z = (u_t)_s; (u_m)_r = (u_m)_w; (u_m)_\varphi = (u_m)_\chi; \\ (u_m)_z = (u_m)_s; (u_k)_r = (u_k)_w; (u_k)_\varphi = (u_k)_\chi; (u_k)_z = (u_k)_s; C_t = (C_t)_{\min}; C_m = (C_m)_{\min}; \\ ; ; ; ; ; ; . \end{aligned}$$

Граничные условия на внутренней поверхности цилиндрической части

гідроциклона ($r = R_u$):

$$\begin{aligned} u_r = u_\varphi = u_z = 0; & (u_t)_r = (u_t)_\varphi = 0; (u_t)_z = (u_t)_\xi; (u_m)_r = (u_m)_\xi; (u_m)_\varphi = (u_m)_\delta; \\ (u_m)_z = (u_m)_\xi; & (u_k)_r = (u_k)_\xi; (u_k)_\varphi = (u_k)_\delta; (u_k)_z = (u_k)_\xi; C_t = (C_t)_{ma\delta}; C_m = (C_m)_{ma\delta}; \\ C_k = (C_k)_{ma\delta}; & D = P_{\tilde{n}}; P_t = (P_t)_{\tilde{n}}; v_t = (v_t)_{\tilde{n}}; B_t = (B_t)_{\min}; B_m = (B_m)_{\min}; D_t = (D_t)_{\min}; \\ & D_m = (D_m)_{\min}. \end{aligned}$$

Начальные условия для цилиндрической части гидроциклона ($z = 0, t = 0$):

$$\begin{aligned} u_r = (u_r)_0; u_\varphi = (u_\varphi)_0; u_z = (u_z)_0; & (u_t)_r = (u_t)_\eta; (u_t)_\varphi = (u_t)_\psi; (u_t)_z = (u_t)_0; \\ (u_m)_r = (u_m)_\eta; (u_m)_\varphi = (u_m)_\psi; & (u_m)_z = (u_m)_0; (u_k)_r = (u_k)_\eta; (u_k)_\varphi = (u_k)_\psi; \\ (u_k)_z = (u_k)_0; C_t = (C_t)_0; C_m = (C_m)_0; & C_k = (C_k)_0; D = P_0; P_t = (P_t)_0; v_t = (v_t)_0; \\ B_t = (B_t)_0; B_m = (B_m)_0; D_t = (D_t)_0; & D_m = (D_m)_0. \end{aligned}$$

Граничные условия на поверхности воздушного столба ($r = 0,5d_g$):

$$\begin{aligned} u_r = (u_r)_{\hat{a}}; u_\varphi = (u_\varphi)_{\hat{a}}; u_z = (u_z)_{\hat{a}}; & (u_t)_r = (u_t)_\Omega; (u_t)_\varphi = (u_t)_\lambda; (u_t)_z = (u_t)_\vartheta; (u_m)_r = (u_m)_\Omega; \\ (u_m)_\varphi = (u_m)_\lambda; (u_m)_z = (u_m)_\vartheta; & (u_k)_r = (u_k)_\Omega; (u_k)_\varphi = (u_k)_\lambda; (u_k)_z = (u_k)_\vartheta; D = P_{\hat{a}}; \\ P_t = (P_t)_{\hat{a}}; C_t = (C_t)_{\min}; C_m = (C_m)_{\min}; & C_k = (C_k)_{\min}; v_t = (v_t)_{\hat{a}}; B_t = (B_t)_{\hat{a}}; B_m = (B_m)_{\hat{a}}; \\ D_t = (D_t)_{\hat{a}}; D_m = (D_m)_{\hat{a}}. \end{aligned}$$

Граничные условия на поверхности соприкосновения перемешанного слоя пульпы ($h_k + h_r$) с кромками пластин, образующих цилиндрическую поверхность ($r = R_n$):

$$\begin{aligned} u_r = u_\varphi = 0; u_z = (u_z)_{\bar{i}}; & (u_t)_r = (u_t)_\varphi = 0; (u_t)_z = (u_t)_{\bar{i}}; (u_m)_r = (u_m)_\varphi = 0; D = P_{\bar{i}}; \\ P_t = (P_t)_{\bar{i}}; (u_m)_z = (u_m)_{\bar{i}}; & (u_k)_r = (u_k)_\varphi = 0; (u_k)_z = (u_k)_{\bar{i}}; C_t = (C_t)_{\bar{i}}; C_m = (C_m)_{\bar{i}}; \\ C_k = (C_k)_{\bar{i}}; v_t = (v_t)_{\bar{i}}; & B_t = (B_t)_{\bar{i}}; B_m = (B_m)_{\bar{i}}; D_t = (D_t)_{\bar{i}}; D_m = (D_m)_{\bar{i}}. \end{aligned}$$

Начальные условия для цилиндрической части гидроциклона ($z = l_u, t = 0$):

$$\begin{aligned} u_r = (u_r)_l; u_\varphi = (u_\varphi)_l; u_z = (u_z)_l; & (u_t)_r = (u_t)_\varepsilon; (u_t)_\varphi = (u_t)_\theta; (u_t)_z = (u_t)_l; D = P_l; \\ P_t = (P_t)_l; (u_m)_r = (u_m)_\varepsilon; & (u_m)_\varphi = (u_m)_\theta; (u_m)_z = (u_m)_l; (u_k)_r = (u_k)_\varepsilon; (u_k)_\varphi = (u_k)_\theta; \\ & ; \quad ; \quad ; \quad ; \quad ; \quad ; \end{aligned}$$

$$D_t = (D_t)_l; D_m = (D_m)_l.$$

Приведенная математическая модель может быть реализована с использованием методов конечных разностей [15] и контрольных объемов [16].

Выводы и направления дальнейших исследований:

- при математическом моделировании процесса осаждения твердой фазы пульпы в межпластинчатом канале можно применить однослойную схему двухмерного турбулентного течения пульпы и целесообразно совместно с уравнениями осредненного турбулентного движения двухфазной среды использовать соотношения для определения интенсивности турбулентности и коэффициента турбулентной диффузии твердых частиц;
- на процесс перечистки твердой фазы пульпы с помощью пластин, установленных в конической части гидроциклона, влияют геометрия и размеры пластин, гидродинамика отрывных течений и механизм формирования концентрированного, разрыхленного и перечистного слоев пульпы;
- основными факторами, повышающими эффективность перечистки твердой фазы пульпы в гидроциклоне, являются нисходящее безвихревое течение концентрированного слоя пульпы в межпластинчатых каналах, захват этим течением крупных частиц и вынос тонких и мелких частиц турбулентными вихрями в приосевую зону гидроциклона.

Автором предполагается в дальнейших исследованиях полученные результаты взять за базовые при анализе особенностей сепарации твердой фазы пульпы в цилиндрическом гидроциклоне [17, 18].

Список литературы

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкостей и газа [Текст] / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1970. – 906 с.
2. Фортъе А. Механика суспензий [Текст] / А. Фортъе – М.: Мир, 1971. – 264 с.
3. Проблемы гравитационного обогащения титано-цирконовых песков [Текст] / Б.А. Блюсс, А.М. Сокил, О.Г. Гоман. – Днепропетровск: Полиграфист, 1999. – 190 с.
4. Пилов П.И. Распределение частиц твердой фазы в турбулентном потоке жидкости при выделении осадка [Текст] / П.И. Пилов // Наук. вісн. Національного гірничого університету. – 1998. – №1. – С. 74 – 77.
5. Косой Г.М. Сопротивление твердых частиц при стесненном движении жидкости [Текст] / Г.М. Косой, В.В. Сапешко // Обогащение полезных ископаемых : Респ. межвед. науч. – техн. сб. – 1986. – Вып. 36. – С. 36 – 40.
6. Кривошеков В.И. Распределение концентрации твердых частиц суспензии в канале с параллельными и суживающимися стенками [Текст] / В.И. Кривошеков, Л.А. Новиков // Збагачення корисних копалин: Наук. – техн. зб. – 2008. – Вип. 34(75). – С. 86 – 97.
7. Щукин В.К. Теплообмен, массоперенос и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах [Текст] / В.К. Щукин, А.А. Халатов. – М. : Машиностроение,

1982. – 200 с.

8. **Тихонов О.Н.** Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых [Текст] / О.Н. Тихонов. – М.: Недра, 1984. – 207 с.

9. А. с. 1655575 СССР, МКИ³ В 03 В 5/34. Гидроциклон для классификации и обогащения полезных ископаемых [Текст] / Н.Г. Бедрань, В.И. Кривошеков, Я.С. Гольдберг (СССР). № 4721330/03; заявл. 15.06.1989; опубл. 15.06.91, бюл. № 22.

10. **Кривошеков В.И.** Предпосылки эффективной работы гидроциклона [Текст] / В.И. Кривошеков // Збагачення корисних копалин : Наук.-техн. зб. – 1999. – Вип. 5 (46). – С. 72 – 77.

11. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 711 с.

12. **Кривошеков В.И.** Определение коэффициента диффузии твердых частиц в турбулентном потоке пульпы [Текст] / В.И. Кривошеков // Збагачення корисних копалин : Наук. – техн. зб. – 1999. – Вип. 4 (45). – С. 77–78.

13. **Кривошеков В.И.** Кинетический подход к выводу уравнений движения двухфазной среды в сепарационных аппаратах [Текст] / В.И. Кривошеков // Обогащение руд. – 2001. – №6. – С. 23 – 26.

14. Справочник по высшей математике [Текст] / А.А. Гусак, Г.М. Гусак, Е.А. Бричикова. – Минск : ТетраСистемс, 1999. – 640 с.

15. **Иевлев В.М.** Численное моделирование турбулентных течений [Текст] / Иевлев В.М. – М. : Наука, 1990. – 216 с.

16. **Приходько А.А.** Компьютерные технологии в аэрогидродинамике и тепломассообмене [Текст] / А.А. Приходько. – К. : Наук. думка, 2003. – 379 с.

17. Пат. 46580 Україна. Гідроциклон для класифікації і збагачення корисних копалин [Текст] / В.І. Кривошеков. Заявл. 28.08.2001; опубл. 15.02.2005.

18. **Кривошеков В.И.** Гидросепарация в асимметричном потоке пульпы: способ и устройства [Текст] / В.И. Кривошеков // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2008. – Вип. 33 (74). – С. 65–68.

© Кривошеков В.И., 2008

*Надійшла до редколегії 24.09.2008 р
Рекомендовано до публікації д.т.н. Б.О. Блюссом*

УДК 622.7

О.Н. ЧЕЧЕЛЬ

(Украина, Димитров, ОФ ООО "ПК "Донецкое угольное топливо")

ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ВИНТОВЫХ ШЛЮЗОВ С ЭЛАСТИЧНЫМ ЖЕЛОБОМ SLRS2-1000.1 ПРОИЗВОДСТВА ЗАО "АНА-ТЕМС" В ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ УГЛЕЙ МЕЛКИХ КЛАССОВ

На обогатительной фабрике ОФ ООО "ПК "Донецкое угольное топливо"

105

Збагачення корисних копалин, 2009. – Вип. 36(77) – 37(78)

осуществляется обогащение рядового угля марки "Г" в тяжелосреднем сепараторе СКВ-20 и в тяжелосреднем гидроциклоне ГТ-710. Увеличение содержания мелочи в рядовом угле и ужесточении требований к качеству готовой продукции приводит к необходимости уделять больше внимания обогащению углей мелких классов.

Первоначально для определения принципиальной возможности использования винтовых шлюзов с эластичным желобом SISR2-1000.1 производства ЗАО "АНА-ТЕМС" в технологии обогащения угля марки "Г" крупностью

0–2 мм на фабрике был установлен один винтовой шлюз с эластичным желобом.

После получения положительных результатов работы винтового шлюза была разработана и внедрена технологическая схема обогащения углей мелких классов, предусматривающая обогащение на винтовых шлюзах первичных и вторичных шламов с последующим объединением концентратов первичных и вторичных шламов и последующей перемешкой на винтовых шлюзах.

Первичные шламы сгущаются в гидроциклонах ГЦ 630 с перемешкой слива в гидроциклонах ГЦ 350. Сгущенный продукт с плотностью 150–350 г/литр поступает на четыре винтовых шлюза с эластичным желобом для дальнейшего обогащения. Технические показатели работы винтовых шлюзов см. табл. 1.

Вторичные шламы сгущаются в гидроциклонах ГЦ 240. Сгущенный продукт с плотностью 130–350 г/литр поступает на четыре винтовых шлюза с эластичным желобом для дальнейшего обогащения. Технические показатели работы винтовых шлюзов см. табл. 2.

Таблица 1

Результаты обогащения первичных шламов									
Продукт	Проба №1			Проба №2			Проба №3		
	Т:Ж, г/л	A ^d , %	Q, т/ч	Т:Ж, г/л	A ^d , %	Q, т/ч	Т:Ж, г/л	A ^d , %	Q, т/ч
Исходный	140	39,7	23,3	170	35,6	21,8	210	35,2	22,6
Концентрат		21,4	13,1		17,8	13,1		16,1	12,7
Отходы		72,5	10,2		76,9	8,7		75,8	9,9

Таблица 2

Результаты обогащения вторичных шламов									
Продукт	Проба №1			Проба №2			Проба №3		
	Т:Ж, г/л	A ^d , %	Q, т/ч	Т:Ж, г/л	A ^d , %	Q, т/ч	Т:Ж, г/л	A ^d , %	Q, т/ч
Исходный	130	42,4	9,9	140	34,9	9,3	170	36,1	9,7
Концентрат		25,4	5,6		18,1	5,6		17,7	5,4
Отходы		71,6	4,3		77,2	3,7		76,7	4,3

При обогащении угля марки "Г" с зольностью более 30% по данным табл. 1 и 2 можно увидеть, что качество концентратов первичных и вторичных шламов полученные после первой стадии обогащения на винтовых шлюзах не отвечает требованиям, предъявляемым к коксовому концентрату. Поэтому, после первой стадии обогащения концентраты первичных и вторичных шламов смешиваются и поступают на четыре винтовых шлюза с эластичным желобом для перечистки. Технические показатели работы винтовых шлюзов см. табл. 3.

Таблица 3

Результаты переобогащения концентратов первичных и вторичных шламов

Продукт	Проба №1			Проба №2			Проба №3		
	Т:Ж, г/л	A ^d , %	Q, т/ч	Т:Ж, г/л	A ^d , %	Q, т/ч	Т:Ж, г/л	A ^d , %	Q, т/ч
Исходный	110	23	33,2	130	18,0	31,1	140	16,8	32,3
Концентрат		13,8	18,7		8,9	18,7		8,4	18,1
Отходы		73,1	14,5		76,8	12,4		76,1	14,2

В результате двойной перечистки первичных и вторичных шламов был получен мелкий концентрат (табл. 3) с зольностью, позволяющей использовать его в качестве присадки к коксовому концентрату.

© Чечель О.Н., 2009

Надійшла до редколегії 24.09.2008 р
Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом

УДК 622.7

С.Г. ПОЛОЖАЙ, канд. техн. наук

(Украина, Днепропетровск. Украинский Государственный химико-технологический университет)

ПРАКТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИНТОВЫХ ШЛЮЗОВ В ОБОГАЩЕНИИ ХРОМСОДЕРЖАЩИХ СИЛИКАТНЫХ НИКЕЛЕВЫХ РУД

Подготовка к строительству технологической линии по гравитационному обогащению силикатных никелевых руд на территории карьера "Липовеньки" Побужского ферроникелевого комбината в Кировоградской области была начата зимой 2008 г. Линию планировалось использовать как для обогащения хромсодержащих силикатных никелевых руд, так и для различных хромсодержащих отходов – молотых шлаков и т.п. Гранулометрический состав сырья поступающего на обогащение не должен был превышать 4мм. Главной задачей, на первичном этапе был выбор основного технологического оборудования. И если для размыва сырья альтернативы скрубер-бутаре не рассматривались, то для обогащения выбор шел между конусными и винтовыми сепараторами, отсадочными машинами и концентрационными столами. Определяющим при выборе винтовых шлюзов стали несколько факторов:

- возможность одновременного обогащения как легких, так и тяжелых фракций;

- устойчивость в работе при колебаниях твердого в питании;

- простота конструкции и отсутствие подвижных элементов.

Выбор в качестве поставщика ЗАО "АНА-ТЕМС" определился представленной двухлетней гарантией на поставляемые сепараторы и использованием в их конструкции резиновых желобов прямоугольного сечения, что предполагало как высокую износостойкость шлюзов, так и возможность работы с мелкими фракциями хромитов.

Конструктивно шлюзы представляют собой двухзаходную трехвитковую резиновую спираль шириной 300 мм смонтированную на центральной стойке с двумя верхними распределительными и двумя нижними делительными воронками. Удобная конструкция рамы шлюза и его незначительный вес значительно облегчили их подачу на технологические площадки и монтаж во время строительства (рис. 1, а).



а



б

Рис.1. а) подача винтового шлюза на технологическую площадку для монтажа легко производится на полном вылете стрелы крана;
б) монтаж разводки шлюзов с использованием стандартных канализационных труб $\varnothing 110\text{мм}$.

Хорошим дополнением в конструкцию шлюза было бы использование в делительных воронках на выходе со шлюза патрубков под $\varnothing 110\text{мм}$, что позволило бы непосредственно присоединять к ним стандартные пластиковые быстромонтируемые канализационные тубы, без дополнительных переходных элементов (рис.1, б).

При отладке и последующей работе линии обогащались силикатные никелевые руды содержащие никель в пределах $0,8\ldots 1\%$ и хром в пределах $4\ldots 6\%$ массовых. Анализ содержания металлов в рудах выполнялся с использованием рентгенофлуоресцентного анализатора Niton-3 с точностью определения по никелю $\pm 0,05\%$ и по хрому $\pm 0,5\%$. В проведенных при отладке линии исследованиях изучались возможность разделения шлюзом прошедших через бутару частиц хромита в пределах $0,1\text{--}4\text{ мм}$ и достигаемая степень обогащения хрома и никеля.

Проведенные измерения показали, что скорость разделения в значительной степени определяется размером частиц. Так, если частицы хромита, подаваемые на ось желоба, имеющие средний размер $0,1\text{ мм}$ скатываются к

внутреннему краю менее чем за 1 оборот, то для частиц размером 4 мм требуются все три витка шлюза (рис. 2)

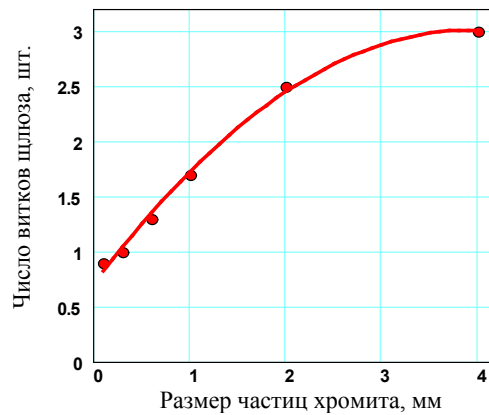


Рис. 2. Зависимость пути проходимой частицами хромита от оси шлюза до внутреннего края, в витках, от их среднего размера

Сама же зависимость пути разделения частиц носит параболический характер, который с корреляционным отношением 0,98 описывается регрессионным уравнением

$$N = 0,7 + 0,17D - 0,5D^2,$$

где N – путь по шлюзу до разделения в витках, а D – диаметр частиц. Таким образом, была подтверждена возможность работы сепаратора в широком диапазоне крупности по подаваемому материалу.

Для определения степени обогащения по сечению желоба шлюза непосредственно у делительных воронок через каждые два сантиметра отбирались пробы для химического анализа, в которых замерялось содержание хрома и никеля. Содержание твердого в питании составляло 120–150 г/литр, и было определено весовым анализом. Полученные результаты представлены на рис. 3.

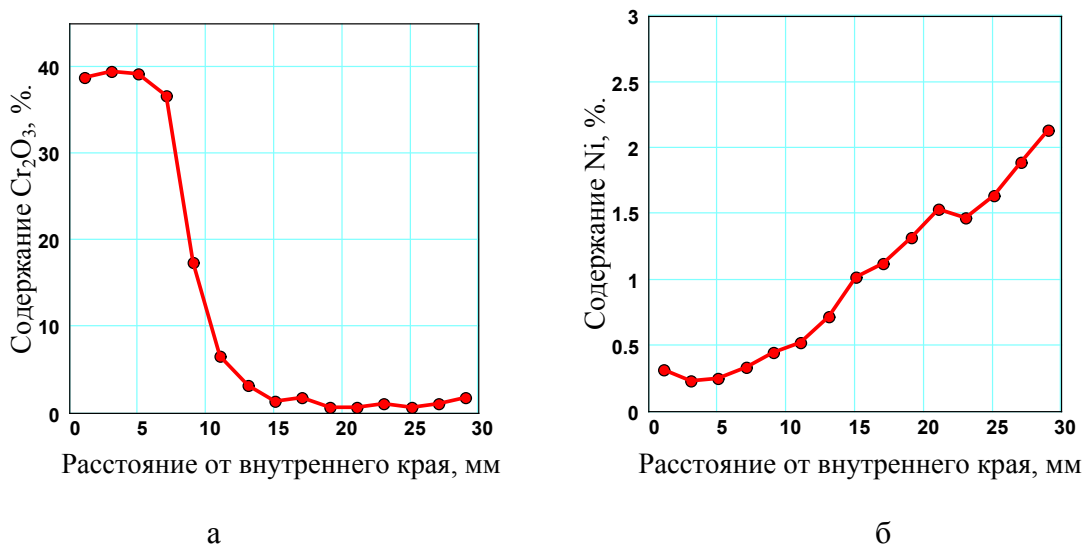


Рис. 3. Распределение (а) хрома (в пересчете на Cr_2O_3), (б) никеля по поперечному сечению желоба у делительной воронки

Из приведенных данных видно, что хромистая составляющая силикатных никелевых руд, представленная практически полностью хромитом выделяется, образуя достаточно широкую полосу, легко вырезаемую лопатками делительной воронки. Никель, сорбированный по большой группе минералов: кварц, глинистые, гидрослюдистые – разделяется гораздо хуже, но, тем не менее, есть возможность выделить никельсодержащую составляющую с повышением содержания никеля от 0,8...1 до 1,4...1,6%. По производительности, в пересчете на один шлюз, можно выделить 2–4 тонны хромового и 4–8 тонн никелевого концентрата в сутки.

Практика использования винтовых шлюзов в течение года на открытой площадке показала их высокую стойкость и практическую нечувствительность, как к атмосферным условиям, так и к истиранию обогащаемыми материалами. Анализ поверхности желобов после года эксплуатации не выявил следов абразивного износа или появления других дефектов. Наблюдается лишь незначительный абразивный износ делительных лопаток, но и их ориентировочный срок службы до замены составит не менее 2-х лет.

Таким образом, практика показала высокую стойкость, надежность и эффективность в эксплуатации винтовых шлюзов ЗАО "АНА-ТЕМС". А их конструктивное решение позволяет с достаточно высокой эффективностью производить обогащение силикатных никелевых руд с дополнительным получением товарного хромового концентрата.

© Положай С.Г., 2009

Надійшла до редколегії 24.09.2008 р

